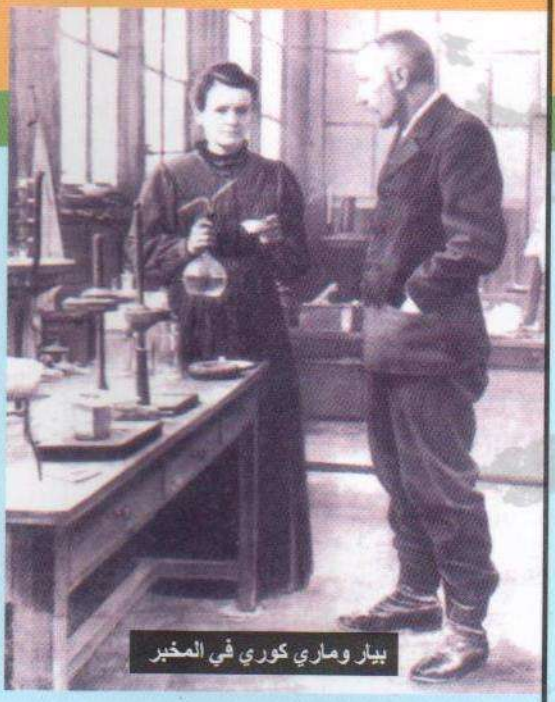
PHYSICS BAC 3AS

ج. سايس
أستاذ جامعي

التحوّلات النووية

درسنا حتى اليوم نوعا واحدا من التحوّلات المعروف بالتحوّلات الكيميائية والذي تتدخل فيه الإلكترونات أثناء تحطم أو تشكل الروابط الكيميائية، تشكل الشوارد أثناء تفاعلات الأكسدة الإرجاعية والتفاعلات حمض/ أساس.
كما توجد أيضا تحولات أخرى تتدخل فيها نوى الذرات والتي تعرف بالتحوّلات النووية.
تم اكتشاف التحوّلات النووية الأولى عن طريق الصدفة، من طرف العالم بيكرال Becquerel سنة 1896 حيث وضع في درج ألواحا فوتوغرافية بجوار عينة من الأورانيوم، وبعد مرور بضعة أيام، لاحظ أن هذه الألواح الفوتوغرافية تأثرت كما لو عرضناها للضوء. فاستنتج بيكرال أن الأورانيوم يصدر تلقائيا إشعاعًا. ثم تطرق من بعده بيار وماري كوري إلى دراسة هذه الظاهرة التي أطلقا عليها اسم «النشاط الإشعاعي - la radioactivité».

هنري بيكرال مكتشف ظاهرة النشاط الإشعاعي


بيار وماري كوري في المخبر

les transformations nucléaires التحولات النووية

النوى الذرية

- **بنية النوى الذرية :**

تتشكل الذرة من إلكترونات ونواة وهذه الأخيرة تتشكل هي أيضا بدورها من دقائق (بروتونات ونوترونات) تسمى النوكليونات (les nucléons).

يرمز لكل نواة بالصيغة ${}^{A}_{Z}X$ ، حيث:

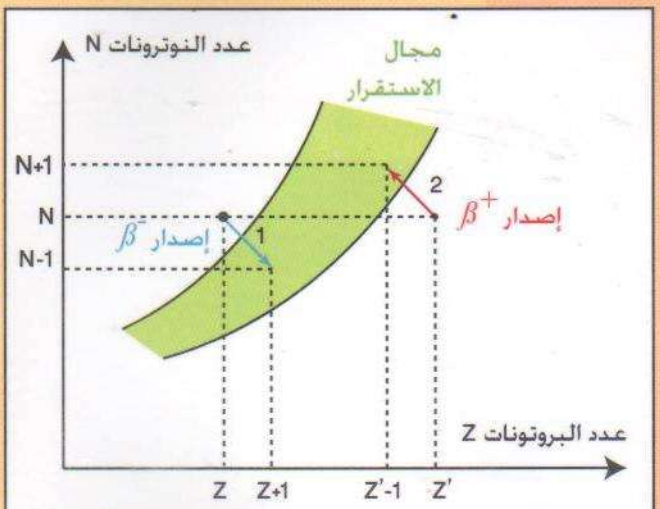
A : عدد النوكليونات أو رقم الكتلة.
Z : العدد الشحني ويوافق إلى عدد البروتونات.
X : رمز العنصر الكيميائي.

يوجد حاليا 112 عنصرًا كيميائيا، كل منها يتميز بعدد البروتونات التي تحتوي عليها نواته.
وهكذا، فإن الشاردة أو الذرة التي تتشكل من 8 بروتونات تنتمي حتما إلى عنصر الأكسجين مهما كان عدد النوترونات والإلكترونات التي تمتلكها.
الذرات، الشوارد أو الأنوية التي تمتلك نفس عدد البروتونات وتختلف في عدد توتروناتها تسمى **النظائر (isotopes)**.

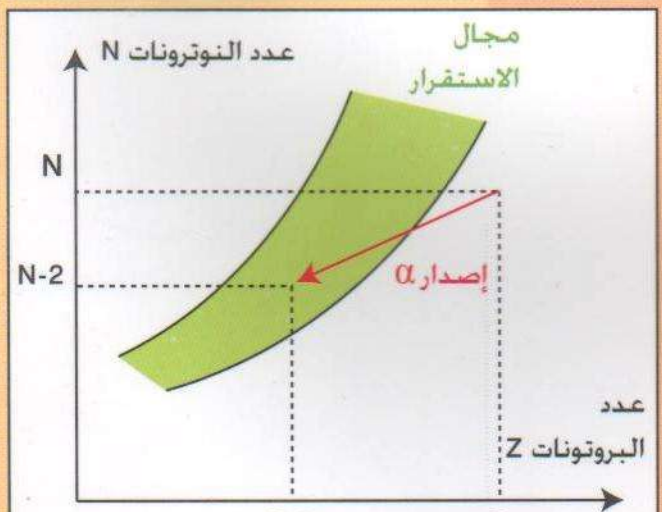
النوى المستقرة و النوى المشعة

ليست كل الأنوية المختلفة المعروفة مستقرة.
تكون النواة مستقرة إذا لم تتغير تلقائيا خلال الزمن في حين أن النواة المشعة (غير المستقرة) تتفكك تلقائيا معطية بذلك نواة جديدة (النواة البنت) مع إصدار دقيقة α أو β وعمومًا إشعاع γ.

- تكون الأنوية مستقرة إذا كان عددا البروتونات و النوترونات متقاربين.
- الأنوية المستقرة الخفيفة التي من أجلها تكون $Z \leq 20$ تحقق العلاقة : $N \approx Z$.
- كل الأنوية المستقرة التي يكون عددها الشحني Z أكبر من 20 تحتوي على عدد من النوترونات أكبر من عدد البروتونات.
- يسمى المجال الذي يحتوي على الأنوية المستقرة «**وادي الاستقرار**». كل نواة يكون عددها الشحني Z أكبر من 82 هي نواة غير مستقرة.



مخطط يوضح عودة الأنوية نحو مجال الاستقرار في حالة الإصدارين β^+ و β^-



مخطط يوضح عودة الأنوية نحو مجال الاستقرار في حالة الإصدار α

المخطط (Z,N) الذي يعطي مجال استقرار الأنوية

تخضع الأنوية غير المستقرة إلى واحد أو عدة تفككات تلقائية تتحوّل على إثرها إلى أنوية مستقرة.

*** النشاط الإشعاعي α :**

النشاط الإشعاعي α هو التفكك النووي الذي يحدث للأنوية الكبيرة والذي تصدر خلاله أنوية الهيليوم ^4_2He والمعروفة باسم «دقائق α».

تكتب معادلة التحوّل النووي من النوع α بالشكل التالي:

$$^A_ZX \longrightarrow {}^{A'}_{Z'}Y^* + {}^4_2He$$

وتكون قوانين الإنحفاظ التالية محققة خلال التحوّل النووي :

- **قانون انحفاظ الشحنة الكهربائية** : الشحنة الكهربائية للمتفاعلات تساوي إلى الشحنة الكهربائية للنواتج.
- **قانون انحفاظ عدد النيوكليونات** : عدد النيوكليونات ثابت لا يتغير خلال التحوّل النووي.
- **قانون انحفاظ الطاقة.**

واعتمادًا على قانوني الإنحفاظ الأولين، لدينا:

$$Z.e = Z' . e + 2e \Rightarrow Z' = Z - 2$$

$$A = A' + 4 \Rightarrow A' = A - 4$$

وبذلك يمكن كتابة معادلة التفكك النووي على النحو التالي:

$$^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y^* + {}^4_2He$$

تشير كتابة النجمة (*) إلى جنب رمز النواة إلى أن هذه الأخيرة تمتلك طاقة زائدة، فنقول عنها أنها في حالة مثارة (état excité).

مثال : $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He$

*** النشاط الإشعاعي β^- :**

يمكن أن يحصل داخل الأنوية غير المستقرة الغنية بالنوترونات تفككا نوويا من النوع β^- حيث يتم تحويل نوترون إلى بروتون مع إصدار إلكترون كما ترجمه معادلة التفكك النووي التالية:

$$^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$$

وتكتب معادلة التفاعل النووي β^- التي تخضع لها النواة ^A_ZX على النحو التالي:

$$^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y^* + {}^0_{-1}e$$

مثال : $^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^0_{-1}e$

*** النشاط الإشعاعي β^+ :**

النشاط الإشعاعي من النوع β^+ اصطناعي لأنه لا يشمل سوى الأنوية الاصطناعية الفقيرة جدًا بالنوترونات والتي لا يمكنها أن تكون مستقرة وهي على هذا الحال.

ينتج هذا النشاط عن التحوّل، داخل النواة، لبروتون إلى نوترون مع إصدار دقيقة β^+ المعروفة باسم البوزيتون كما توضحه المعادلة التالية:

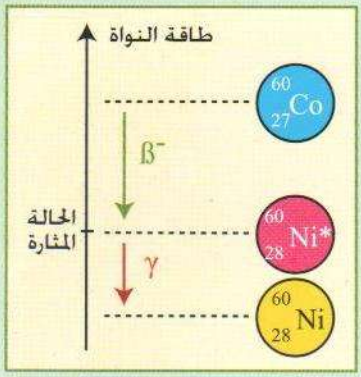
$$^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_1e$$

- **البوزيتون ^0_1e هو دقيقة كتلتها تساوي إلى كتلة الإلكترون $^0_{-1}e$ ولكن شحنته معاكسة له.**

تكتب معادلة التفاعل النووي الذي تخضع له النواة ^A_ZX بالشكل التالي:

$$^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y^* + {}^0_1e$$

مثال : $^{201}_{81}Tl \rightarrow {}^{201}_{80}Hg + {}^0_1e$



* **الإصدار γ** : بعد حدوث التفكك α ، β^+ أو β^- تكون النواة البنت الناتجة في حالة مثارة حيث تملك زيادة من الطاقة.

ترجع النواة البنت إلى حالتها الطبيعية بعد زوال حالة الهيجان وذلك بإصدار إشعاع أو عدة إشعاعات كهرومغناطيسية معروفة بالإشعاعات γ.

وتكتب المعادلة العامة التي تعبر عن زوال حالة الهيجان مع إصدار الإشعاع γ على النحو التالي: $^{A}_{Z}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma$

مثال : $^{60}_{28}Ni^{*} \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + \gamma$

التناقص الإشعاعي

* **قانون التناقص الإشعاعي :**

- التفكك التلقائي $(\alpha, \beta^-, \beta^+)$ لنواة غير مستقرة $^{A}_{Z}X$ هو ظاهرة عشوائية تماما، وبالتالي فإنه يستحيل تَوقّع اللحظة التي تحدث عندها.

وبالمقابل فإنه يمكن توقّع التطور بدلالة الزمن لعدد النوى $^{A}_{Z}X$ المشعة $N(t)$ لعينة إذا كان عدد النوى N_0 في اللحظة $t = 0$ معروفًا.

- ليكن ΔN هو التغير في عدد النوى المشعة $^{A}_{Z}X$ بين اللحظتين t و $t + \Delta t$:

$$\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t) \qquad (\Delta N < 0)$$

إذا كان: $N(t) >> |\Delta N|$، فإن ΔN يكون متناسبا مع:

◄ العدد $N(t)$ للأنوية المشعة $^{A}_{Z}X$ في العينة عند اللحظة t.

◄ المدة الزمنية Δt.

ونكتب إذن : $\Delta N = -\lambda . N(t) . \Delta t$ .... (1)

حيث : $\lambda > 0$.

يسمى «λ» ثابت الإشعاع ويقدر بالوحدات التالية :

$jour^{-1}$ ، h^{-1} ، min^{-1} ، s^{-1}

نعطي في الجدول التالي قيم ثابت الإشعاع λ في بعض الأنوية المشعة:

النواة	$^{14}_{6}C$	$^{236}_{92}U$	$^{222}_{86}Rn$	$^{15}_{8}O$
λ	$1,21\times10^{-4} an^{-1}$	$2,96\times10^{-8} an^{-1}$	$0,18\ jour^{-1}$	$0,340\ min^{-1}$

تسمح العلاقة $\Delta N = -\lambda . N(t) . \Delta t$ بالحصول على المعادلة التالية: $\frac{\Delta N}{\Delta t} + \lambda . N = 0$ ... (1)

وفي الحالة التي يكون فيها ΔN و Δt متناهيين في الصغر، فإنه يمكن تعويض «Δ» بالحرف d الذي يرمز إلى المشتق، ونحصل بذلك على المعادلة التفاضلية التالية:

$$\frac{dN}{dt} + \lambda . N = 0 \ \ldots (2)$$

ونقبل بأن حل هذه المعادلة هو من الشكل :

$$N(t) = A.e^{kt}$$

وبتعويض N بعبارته $A.e^{kt}$ في المعادلة (2) ، نحصل على ما يلي : $kAe^{kt} + \lambda A.e^{kt} = 0$

أي أن : $(k + \lambda)A.e^{kt} = 0$

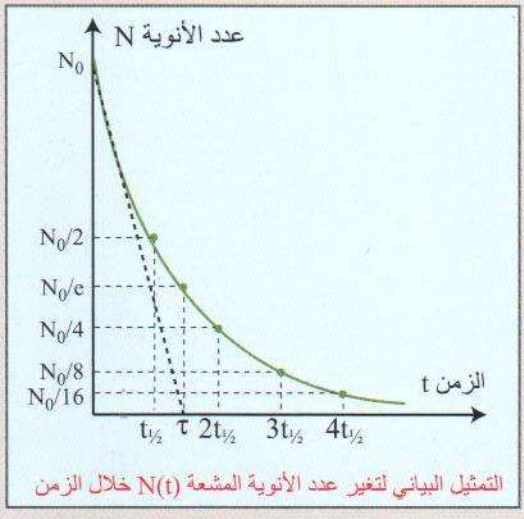
ومنه : $k + \lambda = 0 \Rightarrow k = -\lambda$

وبما أن: $N(t) = Ae^{kt}$ ، إذن: $N(0) = Ae^{0} = A$

مع العلم أن N_0 يوافق إلى $N(0)$. إذن : $A = N_0$

ونحصل بذلك في النهاية على قانون التناقص الإشعاعي:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda . t}$$



التمثيل البياني لتغير عدد الأنوية المشعة N(t) خلال الزمن

نشاط عينة مشعة

يوافق نشاط عينة إلى عدد التفكك التي تخضع لها في ثانية واحدة.

تعريفا: $A(t) = -\frac{dN}{dt}$ ومنه: $A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda.t}$

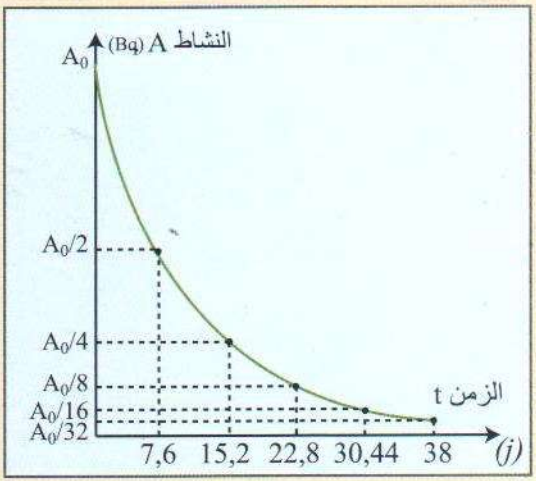
أي أن: $A(t) = \lambda N(t)$ حيث وحدة λ هي s^{-1}

بوضع: $\lambda N_0 = A_0$، نحصل على العلاقة التالية:

$$A(t) = A_0 . e^{-\lambda.t}$$

يقدر النشاط $A(t)$ بوحدة **البيكرال** ***Bq(becquerel)***.

و هو النشاط الموافق إلى تفكك واحد في كل ثانية.



◄ ثابت الزمن τ ونصف العمر $t_{1/2}$ لعنصر مشع:

* يعطى ثابت الزمن τ المميز لعنصر مشع، تعريفًا بالعلاقة: $\tau = \frac{1}{\lambda}$

يقدر τ بالثانية (s) إذا كان ثابت الإشعاع مقدار بـ s^{-1}

يمكن التعبير عن قانون التناقص الإشعاعي والنشاط $A(t)$ لعينة بدلالة ثابت الزمن τ:

$$A = A_0 . e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{و} \quad N = N_0 . e^{-\frac{t}{\tau}}$$

يمكن تعيين ثابت الزمن τ بيانيا، فهو يوافق إلى فاصلة نقطة تقاطع محور الفواصل مع المماس للمنحنى البياني $N(t)$ أو $A(t)$ في اللحظة $t = 0$.

* يوافق نصف العمر $t_{1/2}$ لعنصر مشع إلى الزمن اللازم كي يتفكك نصف عدد أنوية هذا العنصر الموجودة عند اللحظة $t = 0$ والمأخوذة كمبدإ للأزمنة.

◄ العلاقة التي تربط بين $t_{1/2}$ و τ:

تعريفا، لدينا: $N(t+t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$

وفي الحالة الخاصة حيث $t = 0$،

لدينا: $N(t_{1/2}) = \frac{N(0)}{2} = \frac{N_0}{2}$

مع: $N(t_{1/2}) = N_0 . e^{-\lambda.t_{1/2}}$

وعليه: $N_0 . e^{-\lambda.t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}$

ومنه: $e^{-\lambda.t_{1/2}} = \frac{1}{2} \Rightarrow ln(e^{-\lambda.t_{1/2}}) = ln\frac{1}{2}$

أي أن: $-\lambda.t_{1/2} = ln\ 2$

إذن: $t_{1/2} = \frac{ln\ 2}{\lambda}$ أو: $t_{1/2} = \tau . ln\ 2$

نتائج وتطبيقات النشاط الإشعاعي

- المفعولات البيولوجية:

يؤدي اختراق الدقائق $(\alpha, \beta^+, \beta^-)$ وكذلك الإشعاعات γ لجسم الإنسان إلى حدوث تأيّنات تتسبب في تحطيم الخلايا ويمكن أن تؤدي إلى الموت كما يمكن أن تؤدي الإشعاعات إلى تغيير الـ ADN ويترتب عن ذلك تشوّهات جينية.

فكلما كان نشاط المنبع معتبرا كلما كانت المخاطر المنجرة عنه كبيرة.

- **التطبيقات**: توجد عدة تطبيقات للنشاط الإشعاعي، نذكر منها: التأريخ في الجيولوجيا وعلم الآثار، العلاج بالأشعة، التصوير الطبي والتعقيم.

يبقى العلاج بالأشعة هو أحسن طريقة للحد من انتشار الخلايا السرطانية

التكافؤ كتلة - طاقة :

- **علاقة إنشتاين** : تمتلك كل جملة، حتى ولو كانت ساكنة، طاقة بفعل كتلتها تسمى «**طاقة الكتلة**» والتي تحسب بواسطة علاقة إنشتاين التالية:

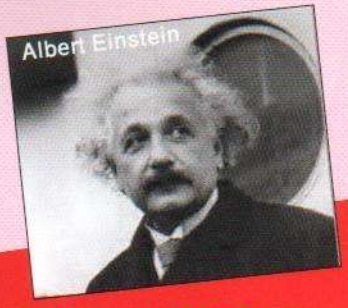
$$E = m.c^2$$

حيث: E هي طاقة الكتلة مقدرة بالجول (J) .
m الكتلة بالكيلوغرام (Kg) .
c سرعة الضوء في الفراغ : $c = 3.10^8 m/s$

لغز الكتلة الناقصة

وتسمى أيضا علاقة إنشتاين بعلاقة التكافؤ بين الكتلة والطاقة والتي بموجبها كل جملة ساكنة **تربح/ تخسر طاقة، تربح/ تخسر كتلة** ويترجم ذلك بالمساواة التالية:

$$\Delta E = \Delta m . c^2$$



وحدات الكتلة والطاقة

◄ **وحدة الكتلة الذرية** : تساوي وحدة الكتلة الذرية u إلى $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرة الكربون 12.
كتلة الكربون 12 هي $12\,u$.

$$1u = 1,66 \times 10^{-27}\ kg$$

◄ **الإلكترون فولط** : يستعمل في تقدير الطاقة على المستوى الذري في التفاعلات النووية وحدة الإلكترون فولط (eV) ومضاعفاته:

$$1eV = 1,62 \times 10^{-19}\ J$$

القيمة	الإسم	الرمز
$10^3\ eV$	الكيلو إلكترون فولط	keV
$10^6\ eV$	الميغا إلكترون فولط	MeV
$10^9\ eV$	الجيغا إلكترون فولط	GeV

طاقة الربط للنواة

◄ **النقص في كتلة النواة** : تتكون النواة ${}^{A}_{Z}X$ من Z بروتونا و $N = A - Z$ نوترونا.
نتوقّع أن تحقق كتلتها m_X المساواة التالية:

$$m_X = Z\,.\,m_p + (A-Z)\,.\,m_n$$

حيث يرمز m_p و m_n إلى كتلة البروتون والنوترون على التوالي.

لكنه في الواقع، فإننا نلاحظ وجود نقص في الكتلة من أجل كل نواة معرف على النحو التالي:

$$\Delta m = Z.m_p + (A-Z).m_n - m_X$$

◄ **طاقة الربط** : طاقة الربط E_ℓ لنواة هي الطاقة التي يجب تقديمها لنواة ساكنة في مرجع معين من أجل تفكيكها إلى مختلف نيوكليوناتها المعزولة والساكنة.
وبتطبيق قانون انحفاظ الطاقة، يمكن كتابة المساواة التالية:

$$m_X c^2 + E_\ell = Z.m_p.c^2 + (A-Z)\,m_n.c^2$$

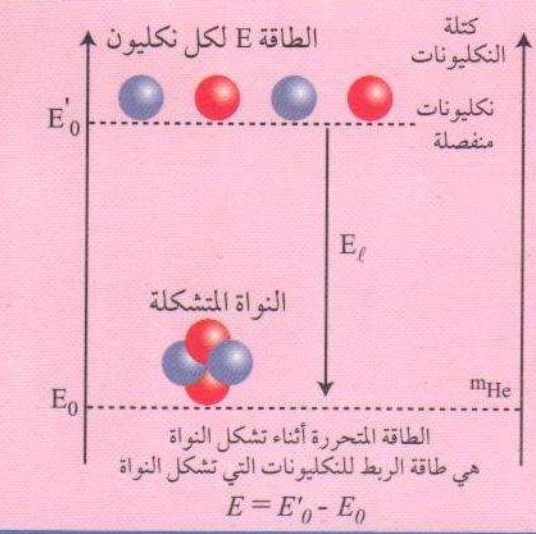
طاقة كتلة النوترونات | طاقة كتلة البروتونات | طاقة كتلة النواة ${}^{A}_{Z}X$

وبذلك تكون طاقة ربط النواة E_ℓ هي:

$$E_\ell = [Z.m_p + (A-Z).m_n].c^2 - m_X c^2$$

$$E_\ell = [Z.m_p + (A-Z).m_n - m_X].c^2$$

$$E_\ell = \Delta m.c^2$$

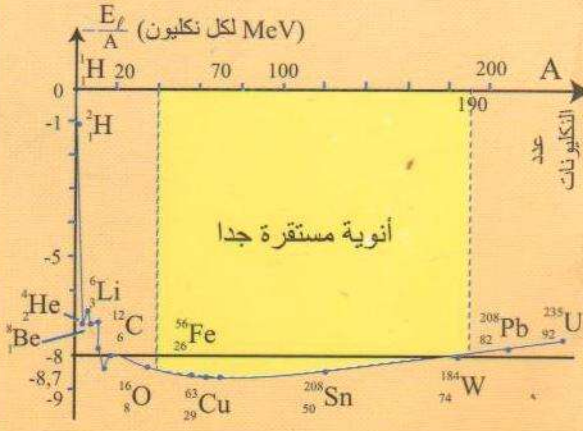


الإنشطار والإندماج النوويان

* طاقة الربط لكل نكليون.

عندما تكون النواة مستقرة، فإن قابليتها للخضوع إلى تفكك نووي ضعيفة نتيجة كونها نواة صلبة، متينة ومتماسكة وهذا يعني أن الطاقة التي يجب صرفها لانتزاع نكليون منها، أي $\frac{E_\ell}{A}$ هي طاقة جد معتبرة.

فكلما كانت النواة أكثر استقرارا، كلما كانت طاقة الربط لكل نكليون $\frac{E_\ell}{A}$ مرتفعة.



تمثل $\frac{E_\ell}{A}$ القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لانتزاع نكليون منها.

ويمكن انتزاع البروتونات بأكثر سهولة من النوترونات، ولقد تم التأكد من أن الأنوية المختلفة التي تشترك في نفس العدد الكتلي (A) لها طاقات الربط لكل نكليون متقاربة.

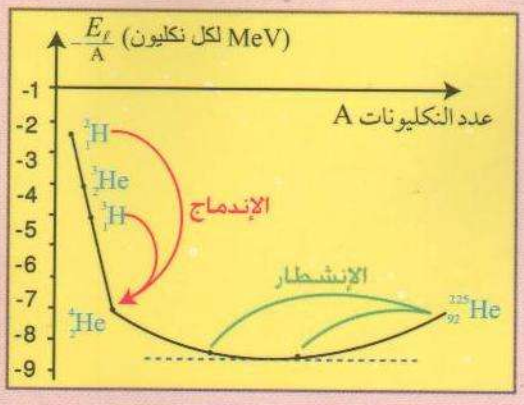
يسمح المنحنى البياني (منحنى أستون Aston) بمتابعة تطور $\frac{E_\ell}{A}$ بدلالة A. وغالبا ما يفضل تمثيل $-\frac{E_\ell}{A}$ بدلالة A.

توجد النقاط الممثلة للأنوية الأكثر استقرارا على الجزء السفلي للمنحنى البياني.

مبدأ الإنشطار والإندماج

يمكن للأنوية التي تمتلك طاقات ربط لكل نكليون ضعيفة نسبيا، أن تتحوّل إلى أنوية أخرى أكثر استقرارا محررة على إثر ذلك طاقة.

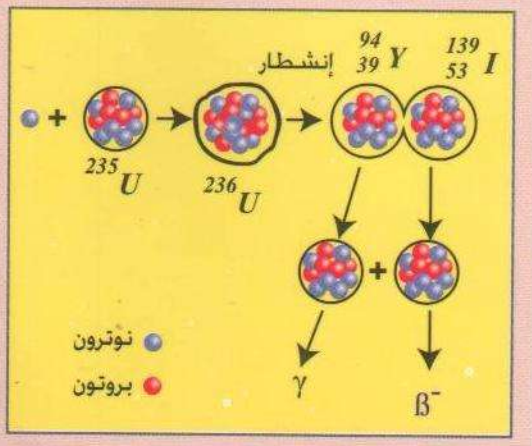
ويمكن أن يتم ذلك بواسطة طريقتين هما الإنشطار والإندماج النوويين.

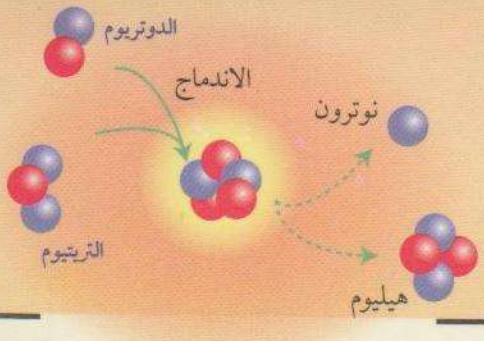


* الإنشطار النووي la fission nucléaire

الإنشطار هو تفاعل نووي مفتعل يتم خلاله انقسام نواة ثقيلة إلى نواتين خفيفتين عموما وذلك تحت تأثير صدمة نوترون، محمل بطاقة حركية مناسبة، مع النواة.

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{139}_{53}I + {}^{94}_{39}Y^{*} + 3\,{}^{1}_{0}n$$





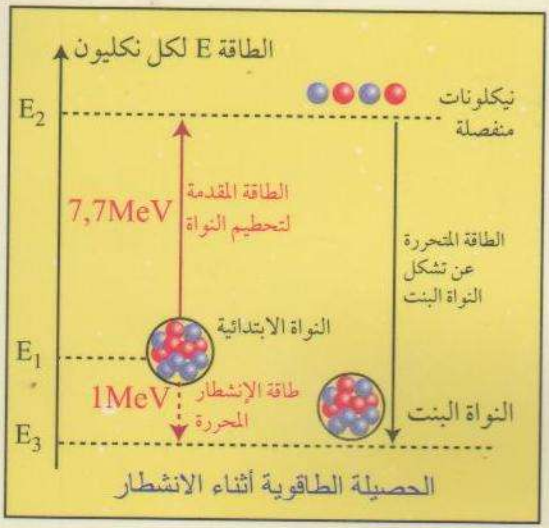
* الإندماج النووي : la fusion nucléaire

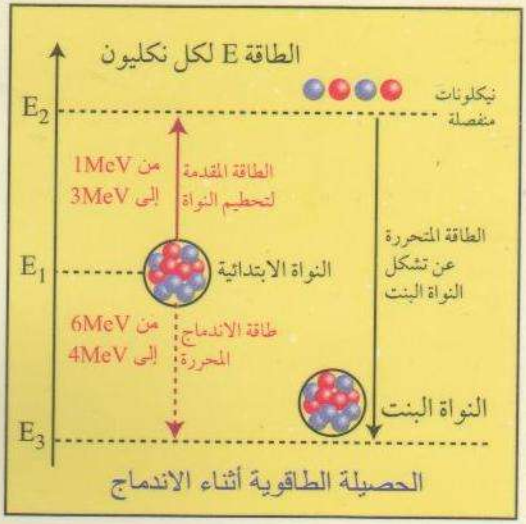
الإندماج هو تفاعل نووي مفتعل يتم خلاله التحام نواتين خفيفتين لتشكيل نواة أثقل مع تحرير طاقة.
يتطلب هذا التفاعل النووي ضغطا ودرجة حرارة جدّ عاليين.

$$ {}_{1}^{3}H + {}_{1}^{2}H \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{0}^{1}n $$

الحصيلة الطاقوية لتفاعل نووي :

يتمثل تحقيق الحصيلة الطاقوية لتفاعل نووي حساب : $\Delta E = E_{produits} - E_{réactifs}$،
حيث $E_{produits}$ و $E_{réactifs}$ هما طاقتا الكتلة للنواتج والمتفاعلات. إذا حررت الجملة طاقة، نقول عن التفاعل أنه ناشر للحرارة ويكون لدينا : $\Delta E < 0$





الطاقة التي يستقبلها الوسط الخارجي على شكل طاقة حركية E_c أو إشعاع γ تساوي إلى : $+\Delta E$

نعتبر تحوّلا نوويا معادلته من الشكل : $ {}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}X_3 + {}_{Z_4}^{A_4}X_4 $

لدينا: $\Delta E = [m({}_{Z_3}^{A_3}X_3) + m({}_{Z_4}^{A_4}X_4) - m({}_{Z_1}^{A_1}X_1) - m({}_{Z_2}^{A_2}X_2)] \cdot c^2$

أي: $\Delta E = [m_{produits} - m_{réactifs}] . c^2$

للإنتقال من الحالة الابتدائية E_i إلى الحالة النهائية E_f، فإن طاقة الجملة تتغير بالمقدار :

$$\Delta E = E_f - E_i$$

وعلى إثر ذلك تربح الجملة الطاقة $E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)$ وتخسر الطاقة $E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)$
ويكون لدينا إذن: $\Delta E = [E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)] - [E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)]$

أي: $\Delta E = E_{\ell(réactifs)} - E_{\ell(produits)}$

2010 - 059
ضبط مطابقته للبرنامج المقرر :
أوراغ مولود مفتش التربية الوطنية
كليك للنشر
CliceEditions
www.cliceditions.com